

Určení rychlosti ztráty hmoty HD 30641 (α Cam)

F7581 Praktická astrofyzika - základy
Artem Gorodilov

1. prosince 2024

1. Abstrakt

V této práci jsem testoval různé metody výpočtu teoretické rychlosti ztráty hmoty hvězdy HD 30641 (α Cam). Spektrální typ hvězdy je O9.5Ia. Použité metody byly navrženy v článku [8] a porovnal jsem je s literárními údaji. Pokusil jsem se také použít metodu popsanou v článku [10], ale neměl jsem k tomu dostatek dat. Kromě toho jsem určil, kdy je hvězda viditelná v Brně. Výpočty byly provedeny pomocí skriptu v Pythonu^[6].

2. Teorie

2.1. Rychlost ztráty hmoty a parametry hvězdy

Radiací poháněné větry v těchto hvězdách vytvářejí šoky vlivem jevu známého jako nestabilita způsobená liniovým pohonem. Tyto šoky zahřívají plyn, což vede ke vzniku rentgenového záření. Vyzařované rentgenové paprsky jsou však zároveň ovlivněny absorpcí uvnitř větru, přičemž tato absorpce hraje klíčovou roli při určování rychlosti ztráty hmoty hvězdy.

V článku [8] byly navrženy dvě metody výpočtu rychlosti ztráty hmoty hvězdy.

První metoda ukazuje vztah mezi logaritmem rychlosti ztráty hmoty, svítivostí hvězdy, hmotností hvězdy, vztahem mezi terminální rychlostí a efektivní únikovou rychlostí a efektivní teplotou hvězdy:

$$\begin{aligned} \log \dot{M} = & -(6.697 \pm 0.061) \\ & + (2.194 \pm 0.021) \log(L_*/10^5) \\ & - (1.131 \pm 0.046) \log(M_*/30) \\ & - (1.226 \pm 0.037) \log\left(\frac{v_\infty/v_{\text{esc}}}{2}\right) \\ & + (0.933 \pm 0.064) \log(T_{\text{eff}}/40000) \\ & - (10.92 \pm 0.90) \log(T_{\text{eff}}/40000)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

kde L_* je svítivost hvězdy, M_* je hmotnost hvězdy, v_∞ je terminální rychlost větru, v_{esc} je efektivní úniková rychlost a T_{eff} je efektivní teplota hvězdy. Tento vztah a fitovací koeficienty platí pro hvězdy s teplotami: $27500 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 50000 \text{ K}$.

Druhá metoda nám umožňuje určit rychlost ztráty hmoty pomocí charakteristické hustoty větru, která je dána vzorcem:

$$\langle \rho \rangle = \frac{\dot{M}}{8\pi R_*^2 v_\infty} \quad (2)$$

kde R_* je poloměr hvězdy. Logaritmus charakteristické hustoty lze zjistit ze vztahu:

$$\log \langle \rho \rangle = -(14.94 \pm 0.54) + (3.2 \pm 2.2) \Gamma_e \quad (3)$$

kde Γ_e je poměr mezi gravitačním a radiačním zrychlením.

Je však třeba vzít v úvahu, že tento vztah platí pro interval teplot $22.5 \text{ kK} \lesssim T_{\text{eff}} \lesssim 26 \text{ kK}$. V tomto intervalu dochází k tzv. bi-stabilnímu skoku, který je pozorován při terminální rychlosti $v_\infty \simeq 2.6 v_{\text{esc}}$ ^[9].

2.2. Metalicita hvězdy

Kromě toho jsem chtěl otestovat metodu navrženou v článku [10]. V něm byl výpočet rychlosti ztráty hmoty proveden pomocí metalicity hvězdy. Pro horkou stranu bi-stabilního skoku ($27500 \text{ K} < T_{\text{eff}} \leq 50000 \text{ K}$.) vyjadřuje předpis následovně:

$$\begin{aligned} \log \dot{M} = & -(6.697 \pm 0.061) \\ & + (2.194 \pm 0.021) \log(L_*/10^5) \\ & - (1.131 \pm 0.046) \log(M_*/30) \\ & - (1.226 \pm 0.037) \log\left(\frac{v_\infty/v_{\text{esc}}}{2}\right) \\ & + (0.933 \pm 0.064) \log(T_{\text{eff}}/40000) \\ & - (10.92 \pm 0.90) \log(T_{\text{eff}}/40000)^2 \\ & + (0.85 \pm 0.10) \log(Z/Z_\odot) \end{aligned} \quad (4)$$

Nebo pomocí vzorce (2):

$$\begin{aligned} \log\langle\rho\rangle = & - (14.94 \pm 0.54) \\ & + (0.85 \pm 1.0) \log(Z/Z_{\odot}) \\ & + (3.2 \pm 2.2) \Gamma_e \end{aligned} \quad (5)$$

kde Z je metalicita hvězdy a Z_{\odot} je metalicita Slunce. Metalicita hvězdy da se určit pomocí vztahu:

$$[Fe/H] = \log\left(\frac{Z}{X}\right)_* - 1.61 = \log\left(\frac{Z_*}{Z_{\odot}}\right) \quad (6)$$

2.3. Pozorovatelnost hvězdy

Pozorovatelnost hvězdy zjistím podle toho, že cirkumpolární hvězdy během roku nezacházejí pod obzor:

$$\delta_{\min} > 90^\circ - \phi$$

kde δ_{\min} je deklinace, kdy hvězda zachází pod obzor, δ_{pol} je deklinace pólu a ϕ je zeměpisná šířka pozorovatele.

3. Data

3.1. Rychlost ztráty hmoty

Pro výpočet rychlosti ztráty hmoty jsem použil následující data:

Parametr	Hodnota
$\log L_*$	$5.71^{[3]}, 5.51^{[1]} L_{\odot}$
M_*	$43^{[2]} M_{\odot}$
v_{∞}	$(1550 \pm 60)^{[2]} \text{ km/s}$
v_{esc}	$640^{[2]} \text{ km/s}$
T_{eff}	$30900^{[2]} \text{ K}$
R_*	$24.9^{[3]}, 19.6^{[1]} R_{\odot}$
Γ_e	$0.32^{[3]}$

Údaje z článku [1] jsou uvedeny za předpokladu, že hvězda je utíkající.

3.2. Pozorovatelnost hvězdy

Hvězda α Cam je viditelná v souhvězdí Kameleonu. Její souřadnice jsou:

$$\alpha = 04^{\text{h}} 54^{\text{m}} 03.011^{\text{s}}, \quad \delta = +66^\circ 20' 33.634''$$

Koordinaty Brna jsou:

$$\phi = 49^\circ 11' 42.79''\text{N}, \quad \lambda = 16^\circ 36' 28.66''\text{E}$$

4. Výsledky

4.1. Rychlost ztráty hmoty

Po výpočtech podle modelu (1) jsem získali následující hodnoty \dot{M} :

$$\dot{M} = (1.53 \pm 0.28) \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

$$\dot{M}_{\text{runaway}} = (6.38 \pm 1.61) \times 10^{-9} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

Výpočty podle modelu (2), (3) poskytly tyto výsledky:

$$\langle\rho\rangle = (1.21 \pm 2.48) \times 10^{-14} \text{ g cm}^{-3}$$

$$\dot{M}_{\text{bi-stab}} = (2.93 \pm 5.99) \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

$$\dot{M}_{\text{bi-stab, runaway}} = (1.74 \pm 3.56) \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

Histogram je zobrazen na obrázku (1).

4.2. Pozorovatelnost hvězdy

Deklinace, kdy hvězda α Cam zachází pod obzor, je:

$$\delta_{\min} = 40^\circ 48' 17.21'' > 90^\circ$$

Hvězda je tedy cirkumpolární a je viditelná po celý rok v noci v Brně.

5. Závěr

Porovnáním výsledků, které jsem získal, s literárními údaji:

$$\dot{M}_{\text{H}\alpha} = 4.2^{[3]} \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

$$\dot{M}_{\text{H}\alpha, \text{runaway}} = 2.9^{[3]} \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

$$\dot{M}_{\text{radio flux}} = (3.89 \pm 1.61)^{[2]} \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

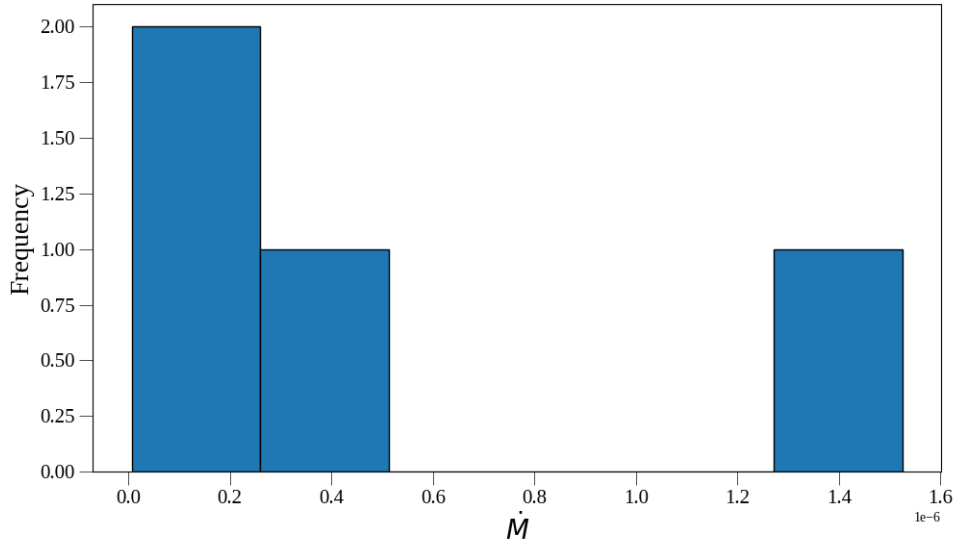
$$\dot{M}_{\text{H}\alpha} = (3.39 \pm 1.40)^{[2]} \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

$$\dot{M}_{\text{H}\alpha} = (3.5 \pm 0.3)^{[5]} \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

$$\dot{M}_{\text{Metalicita}} = 6.04^{[4]} \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

je vidět, že teoretické výsledky se liší o 1-3 řády od údajů získaných pozorováním.

Během posledních patnácti let se objevila řada náznaků, že predikce od Vinka a kol. nejsou v souladu s pozorováními, a to nad rámec očekávaných nejistot. Modely Vinka a kol. předpovídají ztrátu hmoty u mnoha těchto hvězd přibližně $\sim 1-2 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, zatímco různé diagnostické metody (včetně rentgenových, UV a optických měření) tyto odhady snižují o faktor 2-3^[7]. Příkladem je hvězda ζ Ori, kde teoretická hodnota je $\dot{M}_{\text{teor}} = 1.2 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, zatímco pozorovaná hodnota je výrazně nižší, $\dot{M}_{\text{obs}} = (3.4 \pm 0.6) \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Příčina této nesrovnalosti zůstává neznámá.



Obrázek (1) Histogram rychlosti ztráty hmoty

Reference

- [1] D. R. Gies. The Kinematical and Binary Properties of Association and Field O Stars. *ApJS*, 64:545, July 1987.
- [2] Henny J. G. L. M. Lamers and Claus Leitherer. What are the Mass-Loss Rates of O Stars? *ApJ*, 412:771, August 1993.
- [3] N. Markova, J. Puls, T. Repolust, and H. Markov. Bright OB stars in the Galaxy. I. Mass-loss and wind-momentum rates of O-type stars: A pure $H\alpha$ analysis accounting for line-blanketing. *A&A*, 413:693–709, January 2004.
- [4] M. R. Mokiem, A. de Koter, J. S. Vink, J. Puls, C. J. Evans, S. J. Smartt, P. A. Crowther, A. Herrero, N. Langer, D. J. Lennon, F. Najarro, and M. R. Villamariz. The empirical metallicity dependence of the mass-loss rate of O- and early B-type stars. *A&A*, 473(2):603–614, October 2007.
- [5] G. L. Olson and D. Ebbets. Mass-loss rates in early-type stars determined by fitting balmer alf profiles. *ApJ*, 248:1021–1030, September 1981.
- [6] PoruchikRzhevsky. *Prakticka-astrofizika*. <https://github.com/PoruchikRzhevsky/Prakticka-astrofizika>.
- [7] J. Puls, N. Markova, S. Scuderi, C. Stanghellini, O. G. Taranova, A. W. Burnley, and I. D. Howarth. Bright OB stars in the Galaxy. III. Constraints on the radial stratification of the clumping factor in hot star winds from a combined $H\alpha$, IR and radio analysis. *A&A*, 454(2):625–651, August 2006.
- [8] J. S. Vink, A. de Koter, and H. J. G. L. M. Lamers. New theoretical mass-loss rates of O and B stars. *A&A*, 362:295–309, October 2000.
- [9] J. S. Vink, A. de Koter, and H. J. G. L. M. Lamers. The Bi-Stability Jump of Radiation Driven Winds. In Henny Lamers and Arved Sapar, editors, *Thermal and Ionization Aspects of Flows from Hot Stars*, volume 204 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 427, January 2000.
- [10] Jorick S. Vink, A. de Koter, and H. J. G. L. M. Lamers. Mass-loss predictions for O and B stars as a function of metallicity. *A&A*, 369:574–588, April 2001.